




CONSTRUÇÃO E CONTROLE PID DE UMA PLATAFORMA EXPERIMENTAL CARRO-VIGA

CONSTRUCTION AND PID CONTROL OF AN EXPERIMENTAL CAR-BEAM PLATFORM

Hugo Fernando Yamanaka¹ Carlos Alexandre de Souza Bispo² Lucas Carvalho de Camargo³ Vitor Hugo de Souza Bispo⁴ Uiliam Nelson Lenzion Tomaz Alves⁵ Ricardo Breganon⁶ 

Resumo: A construção de protótipos físicos de sistemas dinâmicos faz-se necessário para complementar o ensino e possibilitar a aplicação de técnicas de controle na prática, especialmente nos cursos de engenharia. Neste sentido, este trabalho apresenta a construção de uma plataforma experimental Carro-Viga, que possui um carro móvel acoplado por meio de quatro roldanas com rolamentos em uma viga na posição horizontal. Esta viga tem seu ângulo com relação à horizontal alterado por meio do acionamento de um servo motor que está acoplado na sua extremidade. Assim, o movimento do carro móvel ao longo do comprimento da viga. Este trabalho também apresenta a implementação experimental de um controlador PID com o objetivo de estabilizar o carro móvel em uma posição desejada. A medida da posição do carro móvel é feita através da leitura de um *encoder* linear. Para a instrumentação eletrônica do sistema, foi utilizada uma placa de aquisição de dados da *National Instruments®*, modelo PCI-6221. Os dados obtidos dessa placa foram processados no *software* Matlab/Simulink®, a fim de gerar o sinal de controle a ser enviado ao sistema. O resultado apresentado neste trabalho é promissor e indica que a plataforma experimental Carro-Viga pode ser utilizada como uma ferramenta didática para a aplicação prática de técnicas de controle e que a estratégia de controle escolhida é uma opção válida para este tipo de aplicação.

Palavras-chave: Carro-Viga, Controlador PID, Sistemas Dinâmicos.

¹ Discente do curso de Engenharia de Controle e Automação, IFPR, Jacarezinho, Paraná, hugofernandoyamanaka@gmail.com.

² Discente do curso de Engenharia de Controle e Automação, IFPR, Jacarezinho, Paraná, carlosalexandrehk@gmail.com.

³ Discente do curso de Engenharia de Controle e Automação, IFPR, Jacarezinho, Paraná, lucasxz.our@gmail.com.

⁴ Discente do curso de Engenharia de Controle e Automação, IFPR, Jacarezinho, Paraná, vitor7181@gmail.com.

⁵ Doutor em Engenharia Elétrica, IFPR, Jacarezinho, Paraná, uiliam.alves@ifpr.edu.br.

⁶ Doutor em Engenharia Mecânica, IFPR, Jacarezinho, Paraná, ricardo.breganon@ifpr.edu.br.

Abstract: The construction of physical prototypes of dynamical systems is necessary to complement the learning process and to enable the application of control techniques in practice, especially in engineering courses. In this sense, this work presents the construction of an experimental Car-Beam platform, which has a mobile car coupled to a beam using four pulleys with bearings in a horizontal position. The angle between this beam and the horizontal line changed through activating a servo motor that is coupled at the end of the beam. Thus, the mobile car moves along the length of the beam. This work also presents the experimental implementation of a PID controller to stabilize the mobile car in the desired position. The position of the car is measured by reading a linear encoder. For the electronic instrumentation of the system, a National Instruments® data acquisition board, model PCI-6221, was used. The data obtained from this board were processed in the Matlab/Simulink® software in order to generate the control signal to be sent to the system. The result presented in this work is promising and indicates that the Car-Beam experimental platform can be used as a didactic tool for the practical application of control techniques and that the chosen control strategy is a valid option for this type of application.

Keywords: Car-Beam, PID Controller, Dynamic Systems.

1 INTRODUÇÃO

À medida que o tempo passa, faz-se necessário a construção de protótipos físicos mais elaborados, visando complementar o aprendizado dos estudantes, nos cursos de engenharia (ENIKOV e CAMPA, 2012). Especialmente para os cursos de engenharia de controle e automação que, segundo Breganon *et al.* (2021), integram conhecimentos das áreas de eletrônica, elétrica, mecânica, computação e controle para a formação dos profissionais.

Um exemplo de protótipo físico muito utilizado para o aprendizado de técnicas de controle é o Bola-Viga, no qual o objetivo de controle consiste em manter em equilíbrio uma bola sobre uma viga na horizontal em uma determinada posição desejada (HAUSER, SASTRY e KOKOTOVIC, 1992; JIANG, MCCORKELL e ZMOOD, 1995; MORAES, RIBEIRO e ALVES, 2019; AZEVEDO e PRADO, 2019). Os protótipos podem ser construídos de diversas formas, apresentando particularidades de projeto, como é o caso do trabalho de Niro *et al.* (2014), que no lugar da bola utilizou um carro móvel, e para medir o deslocamento utilizaram um *encoder* linear. Em Lawrence (2020) e Niro *et al.* (2017), a viga de apoio na vertical é posicionada ao meio da viga horizontal. Já em Niro (2016), esse apoio é posicionado na outra extremidade da viga horizontal.

Neste trabalho apresenta-se o desenvolvimento de uma plataforma experimental didática Carro-Viga, com o objetivo de estudar técnicas de controle para estabilizar o carro móvel em uma posição desejada, através da variação angular de uma viga. A fim de validar o funcionamento do protótipo, um controlador PID (Proporcional, Integral e Derivativo), foi implementado de forma experimental, sem a utilização de um modelo matemático ou de alguma técnica de sintonia de controlador conhecida da literatura.

2 CONSTRUÇÃO DA PLATAFORMA EXPERIMENTAL CARRO-VIGA

A plataforma experimental Carro-Viga foi desenvolvida no Laboratório de Automação e Controle do Instituto Federal do Paraná (IFPR) – Jacarezinho e

constitui-se de um eixo em aço inoxidável de diâmetro de 8 mm fixado por meio de 2 mancais de rolamento, no centro da viga, permitindo realizar a rotação em torno do eixo. Na extremidade do eixo é instalado um perfil estrutural em alumínio 20 x 20 mm, V-slot, 500 mm de comprimento, na posição horizontal, que neste trabalho será denominado viga. Uma guia ajustável com 4 apoios por roldanas de rolamentos de esferas, para permitir o seu movimento, é conectada a viga de alumínio e será definida como carro.

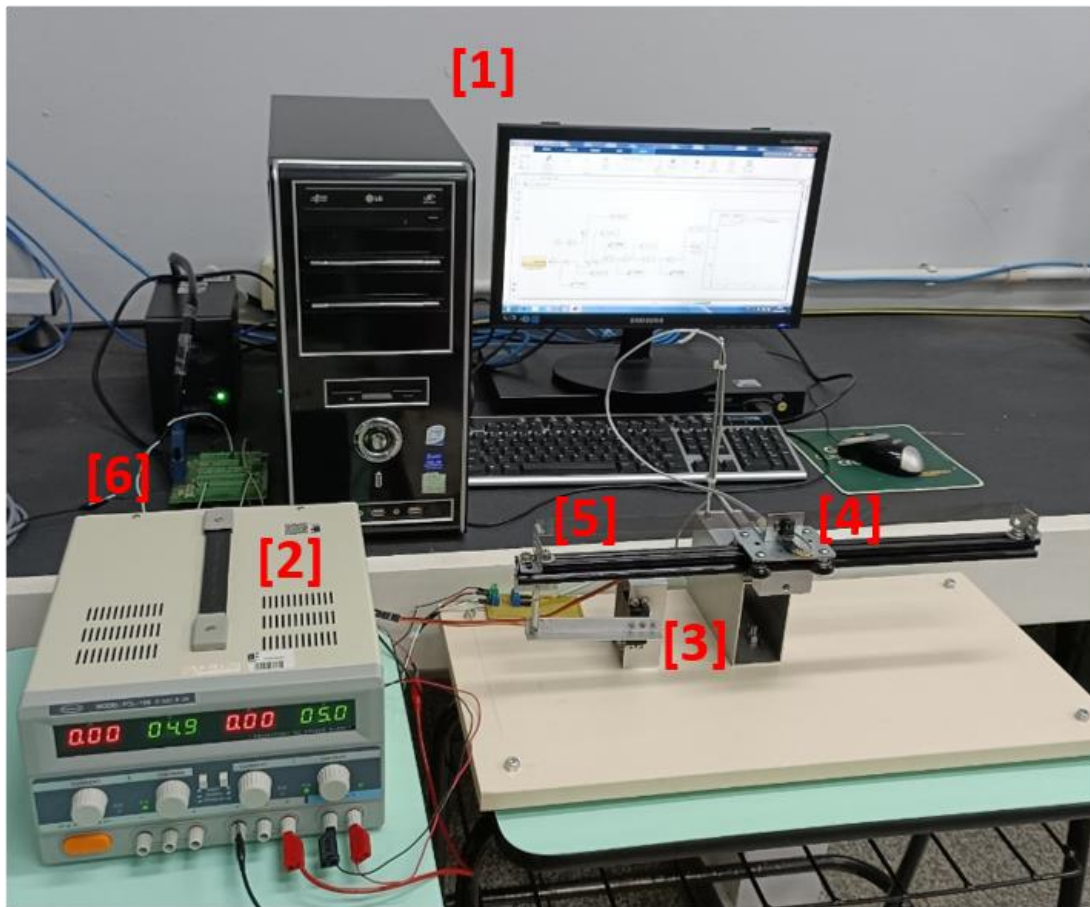
Na Figura 1 é apresentado o setup de funcionamento da plataforma experimental Carro-Viga, na qual os componentes do sistema estão identificados por números.

Dito isto, é utilizado um computador Intel Core 2 Duo E8400 3,00 GHz, com 3 GB de RAM para o controle do sistema [1], onde o acionamento e a aquisição dos dados são realizados através do *software* Matlab/Simulink®.

A fonte de alimentação de 5 V de corrente contínua [2] é a responsável por alimentar o servo motor e o *encoder* linear do sistema. O servo motor utilizado é modelo *TowerPro* MG995 [3], que possui a faixa de torque variável de 9,4 kg.cm com 4,8 V até 11 kg.cm com 6 V, cuja função é realizar o movimento angular do sistema e está acoplado na viga por meio de uma haste em alumínio. O *encoder* linear, modelo H9720, da fabricante AVAGO®, indica a posição do carro móvel [4] ao longo do comprimento da viga, é conectado a uma fita linear, que possui resolução de 150 Lpi (do inglês *Lines per inch*) [5].

O controle da variação angular do servo motor é feito através do sinal PWM (do inglês *Pulse Width Modulation*), e a leitura da medida da posição do carro móvel por meio do *encoder* linear. A comunicação entre os componentes e o computador é realizada por uma placa de aquisição de dados da fabricante *National Instruments*®, modelo PCI-6221 [6].

Figura 1 - Setup da plataforma experimental Carro-Viga.



Fonte: elaborado pelos autores.

3 CONTROLADOR PROPORCIONAL, INTEGRAL E DERIVATIVO (PID)

O controlador PID é uma técnica de controle clássica, que possui três parâmetros: ganho proporcional (K_p), ganho integral (K_i) e ganho derivativo (K_d). O termo proporcional calcula o sinal de controle com base no erro entre a saída do sistema e a entrada (referência), o termo integral elimina o erro estacionário na resposta referente a entrada, e o termo derivativo prevê o erro atuante, permite uma ação corretiva antecipada e tende a aumentar a estabilidade do sistema (OGATA, 2010). Desta forma, o desempenho do controlador PID depende da magnitude relativa desses três ganhos K_p , K_i e K_d . O sinal de controle $u(t)$ calculado por um controlador PID é dado pela Equação (1):

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt}, \quad (1)$$

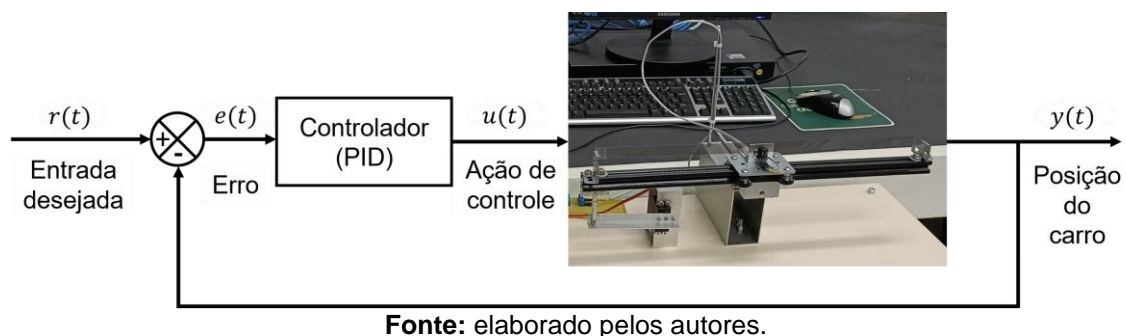
na qual $e(t) = r - y(t)$ representa o erro entre a saída do sistema, $y(t)$, e a referência desejada, r . O controlador PID no domínio da frequência, levando em conta a Equação (1), possui a seguinte função de transferência:

$$\frac{U(t)}{E(t)} = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s. \quad (2)$$

Existem duas formas principais para se encontrar os ganhos K_p , K_i e K_d nas Equações (1) ou (2), uma por meio analítico, onde o modelo do sistema é conhecido, e outra, quando o modelo matemático do sistema não é conhecido e, portanto, os métodos de projeto analítico não podem ser utilizados. Segundo Ogata (2010), os controles PID se mostram os mais eficazes quando o modelo do sistema não é conhecido, pois através de observações do operador sobre o comportamento do sistema, é possível encontrar os ganhos do controlador PID de forma empírica.

Logo, neste trabalho, implementou-se um controlador PID, no qual os ganhos foram encontrados de forma empírica, sem a utilização de um modelo matemático do sistema. Este controlador tem como objetivo estabilizar o protótipo Carro-Viga e fazer com que o carro siga uma trajetória desejada. Na Figura 2 é apresentado o diagrama de blocos do sistema Carro-Viga com o controlador PID utilizado.

Figura 2 - Diagrama de blocos do Carro-Viga com o controlador PID.



Os ganhos encontrados foram

$$K_p = 0,725, K_i = 0,131 \text{ e } K_d = 1,01. \quad (3)$$

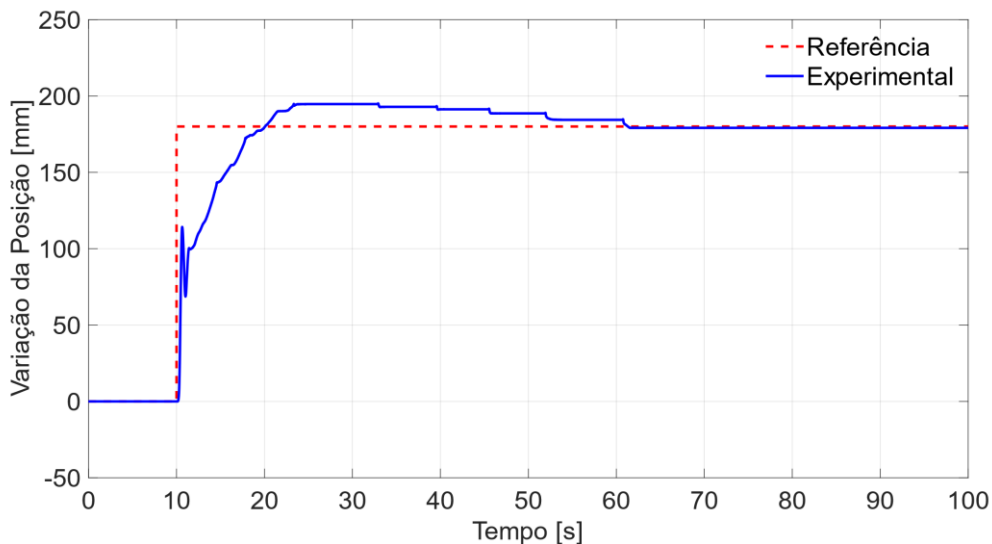
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A fim de validar o funcionamento da plataforma experimental Carro-Viga e controlar a posição do carro, foi implementado um controlador PID através do *software* Matlab/Simulink®. O sinal de entrada do sistema é do tipo degrau dada por

$$r(t) = \begin{cases} 180 \text{ mm}, & 10 \leq t \leq 100 \text{ s} \\ 0, & \text{caso contrário.} \end{cases} \quad (4)$$

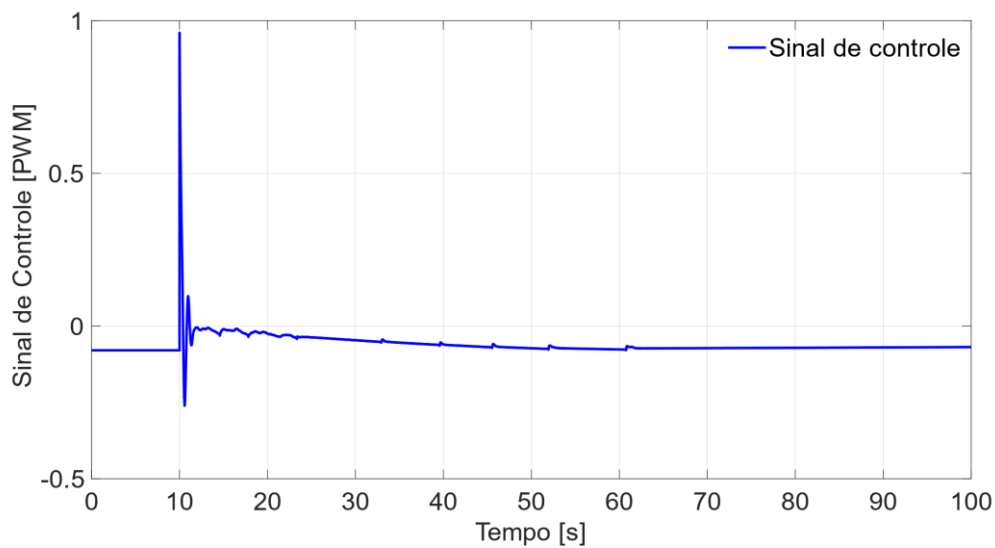
Na Figura 3 é possível observar a resposta experimental do sistema Carro-Viga em relação a entrada (4). Observa-se que a resposta obtida no experimento possui um sobressinal, característico de um controlador PID, estabilizando o carro na posição desejada após o transitório. Na Figura 4 é apresentada a ação de controle, em PWM, necessária para fazer com que o carro chegue até a referência. Por fim, na Figura 5 é mostrado que o erro de posição tendeu a zero e o carro chegou na posição final no instante de tempo de 61,74 segundos.

Figura 3 - Resposta do sistema Carro-Viga com controlador PID.



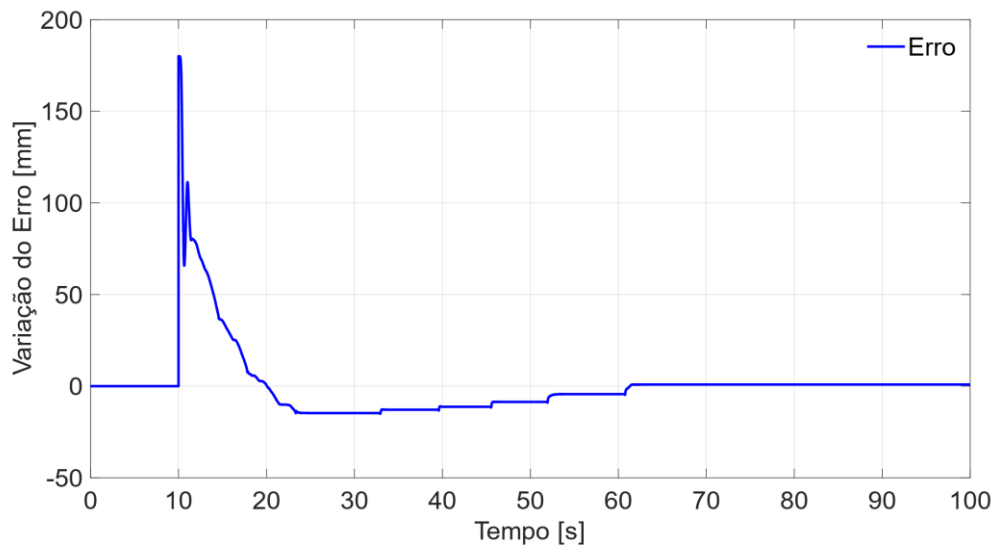
Fonte: elaborado pelos autores.

Figura 4 - Ação de controle obtida no experimento prático do Carro-Viga com controlador PID.



Fonte: elaborado pelos autores.

Figura 5 - Variação do erro no experimento prático do Carro-Viga com controlador PID.



Fonte: elaborado pelos autores.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho apresentou-se a construção de uma plataforma experimental Carro-Viga para o ensino de leis de controle e o desenvolvimento de um controlador PID para validar o funcionamento do sistema. A metodologia utilizada mostra que o controlador foi capaz de estabilizar o sistema na posição desejada.

Como trabalhos futuros pretende-se realizar a identificação das características inerciais da plataforma experimental Carro-Viga, que servirá para levantar o modelo matemático do sistema e por fim, projetar e testar outras técnicas de controle.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq e ao Instituto Federal do Paraná, pelo apoio financeiro e pelo suporte no desenvolvimento deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- AZEVEDO, L.; PRADO, M. L. M. Projeto de um Controlador PD Robusto para um Sistema Viga-Bola. **Anais do XIV Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente - SBAI**. Ouro Preto - MG: Sociedade Brasileira Automática – SBA, 2019.
- BREGANON, R.; ALVES, U. N. L. T.; RIBEIRO, F. S. F.; BARBARA, G. V.; ALMEIDA, J. P. L. S.; PIVOVAR, L. E.; MONTEZUMA, M. A. F.; MENDONÇA, M. Desenvolvimento de sistemas de pêndulos invertidos como ferramentas didáticas em cursos de engenharia de controle e automação. **Holos**. 37(5), p. 1-12, 2021.
- ENIKOV, E. T.; CAMPA, G. Mechatronic aeropendulum: Demonstration of linear and nonlinear feedback control principles with MatLab/Simulink real-time windows target. **IEEE Transactions on Education**, 55(4), p. 538-545, 2012.
- HAUSER, J.; SASTRY, S.; KOKOTOVIC, P. Nonlinear control via approximate input-output linearization: The ball and beam example. **IEEE transactions on automatic control**, v. 37, n. 3, p. 392-398, 1992.
- JIANG, Y.; MCCORKELL, C.; ZMOOD, R. B. Application of neural networks for real time control of a ball-beam system. **Proceedings of ICNN'95-International Conference on Neural Networks**. IEEE, p. 2397-2402, 1995.
- LAWRENCE, B. Tuning of a PID controller for optimal performance of ball and beam system. **International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)**, v. 9, n. 04, p. 1-5, 2020.
- MORAES, M. A. M.; RIBEIRO, J. M. S. R.; ALVES, C. A. A. Projeto de controle para um sistema Viga-Bola. **Anais do XIV Simpósio Brasileiro de**

Automação Inteligente - SBAI. Ouro Preto - MG: Sociedade Brasileira Automática - SBA, 2019.

NIRO, L. **Construção, instrumentação e controle de um bola viga modificado utilizando controle seguidor com realimentação de estados e atribuição de autoestrutura completa em tempo real.** 90 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, 2016.

NIRO, L.; KANEKO, E. H.; MOLLON, M. F.; CHAVES, W. S.; MONTEZUMA, M. A. F. Control of a Modified ball and beam system using tracking system in real time with a DC motor as an actuator. **International Journal of Advanced Engineering Research and Science (IJAERS)**, v.4, n. 12, p. 99-107, 2017.

NIRO, L.; MONTEZUMA, M. A. F.; MENDOÇA, M.; ARRUDA, L. V. R. Controle de um ball and beam utilizando sistema seguidor com atribuição de auto-estrutura completa. **Anais do XX Congresso Brasileiro de Automática.** Belo Horizonte – MG: Sociedade Brasileira Automática - SBA, 2014.

OGATA, K. **Engenharia de Controle Moderno.** 5 ed. São Paulo: Pearson, 2010.

Edição especial – Simpósio de Engenharia de Controle e Automação - SIMECA - IFPR

Enviado em: 27 nov. 2022

Aceito em: 30 nov. 2022

Editor responsável: Mateus das Neves Gomes